

平成30年 5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25289334

研究課題名(和文) 南鳥島EEZに眠るマンガンノジュールとレアアース泥の成因と資源ポテンシャル

研究課題名(英文) Genesis and resource potential of ferromanganese nodules and REY-rich mud within the Minamitorishima EEZ

研究代表者

中村 謙太郎 (Nakamura, Kentaro)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：40512083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、南鳥島EEZにおいて見つけたレアアース泥とマンガンノジュールの探査法確立および分布・成因の解明を目的として実施され、以下の成果を得た。(1) サブボトムプロファイラーおよびマルチビーム音響測深機を用いたレアアース泥とマンガンノジュールの探査手法を確立した。(2) この成果をもとに、南鳥島EEZにおけるこれらの資源の分布とポテンシャルを明らかにした。(3) これらの資源が南鳥島EEZに大量に存在する原因として、海底を流れる深層海流が重要な役割を果たしていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Gophysical and geochemical studies have been performed in order to establish exploration methods for REY-rich mud and ferromanganese nodules in the Minamitorishima EEZ and to elucidate their distributions and ore genesis. Our study produced the following results: (1) Exploration methods for the REY-rich mud and ferromanganese nodules using sub-bottom profiler and multibeam echo sounder have been successfully established. (2) Distributions and resource potentials of the resources have been estimated based on the exploration results. (3) It has been suggested that the presence of both the REY-rich mud and ferromanganese nodules is the result of deep-sea current flowing through the Minamitorishima EEZ.

研究分野：資源地質学

キーワード：南鳥島EEZ レアアース泥 マンガンノジュール サブボトムプロファイラー マルチビーム音響測深機
資源分布 資源ポテンシャル

1. 研究開始当初の背景

希土類元素（レアアース）や V, Co, Ni, Mo などの有価金属元素（レアメタル）は、最先端の電子技術や環境・エネルギー技術に不可欠な元素であり、我が国の産業基盤を支えるための重要な資源である。資源小国である日本は、現状それらの資源のほぼ全てを諸外国からの輸入に頼っている。例えばレアアースは、現在その 95 % 以上を中国一国に頼るという極めて脆弱な供給構造を持っており、2005 年以降の中国による輸出奨励政策から規制強化政策への転換に伴い、レアアースの供給不足や価格急騰が懸念されてきた。そして 2010 年には、尖閣諸島沖での漁船衝突事件をきっかけとして中国がレアアースの輸出停止・制限を行ったことで、世界中にレアアースショックを引き起こし、不安は現実のものとなった。その他のレアメタルについても状況は同じであり、これらの金属資源の安定確保は、日本の経済・産業の未来を左右する喫緊かつ最大の懸案事項となっている。

一方で、我が国は世界第 6 位の排他的経済水域（EEZ）を有する海洋大国であり、そこには豊富な海底鉱物資源が眠っている可能性が指摘されている。この EEZ 内の海底鉱物資源を正確に把握し、開発有望海域の選定を経て、開発にまで至ることができれば、我が国はその主要産業であるハイテク産業を支える資源を自給することも夢ではない。言うなれば、我が国はレアメタルを自給するための切り札を、EEZ 内の海底に保持しているのである。

このような中、申請者らは南鳥島東方沖の EEZ 内において、海底金属鉱物資源として古くから注目されている「マンガンノジュール」が高密度に分布する場所を発見した [1]。さらに 2012 年には、同じく申請者らによって、南鳥島 EEZ 内に、これまで南東太平洋および中央太平洋の公海域にしか知られていなかった、「レアアース泥」が存在していることも確認された [2]。

実は、現状すでに我が国はハワイ沖公海上にマンガンノジュールの鉱区を持っている。また、太平洋の公海上に分布するレアアース泥についても、国際海底機構への申請を経て鉱区を獲得し、これを開発することも、将来的には不可能ではない。しかし、これらの本土から数千 km 以上離れた公海上の資源を、世界各国の同意を得て開発することは、政治的、経済的、時間的コストが極めて高く、非現実的であると言わざるを得ない。一方、もし同様の資源が南鳥島沖の EEZ 内にも大規模に分布していることが確認されれば、複雑な国際調整を経ること無く速やかに開発に着手することが可能であり、その意義は計り知れない。

2. 研究の目的

このような背景をうけ、本研究では南鳥島

EEZ 内のこれらの資源について (1) 効率的な広域探査手法の確立、(2) 資源分布の確定および資源ポテンシャルの見積り、(3) 資源濃集メカニズムの解明を行い、南鳥島 EEZ の「どこに」「どのくらい」、そして「なぜ従来の定説に反して」これらの海底鉱物資源が存在するのかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、本研究では南鳥島 EEZ 内の「マンガンノジュール」と「レアアース泥」を対象として、以下の方法により研究を行った。

(a) サブボトムプロファイラによる海底下浅部の構造探査

南鳥島周辺海域では、これまでに国際深海掘削計画による掘削調査が 4 ヶ所行われている。これらの試料を用いた申請者らのこれまでの研究および文献調査の結果、この海域のレアアース泥はチャート層の直上に存在しており、なおかつレアアース泥の上位は陸源砕屑物で覆われていることがわかっている。海底面とチャート層は、直上の海水もしくは未固結堆積物（レアアース泥を含む）との物性の違いが大きいため、低周波の音響信号を用いたサブボトムプロファイラによって明瞭に捉えることが可能である。また、レアアース泥と表層の堆積物にも物性の違いがあれば、レアアース泥の分布を直接的に捉えることも可能となる。そこで、南鳥島 EEZ 全域を対象に、調査船上からのサブボトムプロファイラによる観測を実施した。

(b) マルチビーム音響測深機による海底後方散乱強度分布の取得

申請者らは、2010 年に南鳥島 EEZ 内に大規模なマンガンノジュールフィールドを発見した [1]。この際に、船上音響探査において強い後方散乱強度を示す場所にノジュールフィールドが存在するという事実を見出した。これは、周囲の堆積物に比べて固く且つ球形のノジュールが海底に敷き詰められているために、マルチビームの角度や海底の傾斜の変化によらず、強い後方散乱を起こすことに起因すると考えられる。つまり、船上音響探査による後方散乱強度分布は、ノジュールフィールドの分布を示す重要な探査指標になると考えられる。そこで、南鳥島 EEZ 全域を対象に、調査船上からのマルチビーム音響測深機による後方散乱強度の観測を実施した。

(c) ピストンコアによる堆積物試料採取と分析

サブボトムプロファイラによる観測データ取得とともに、ピストンコアラーを用いてレアアース泥を含む堆積物試料の採取も行った。これによって得られる堆積物データとサブボトムプロファイラのデータを比較・検討し、サブボト

ムプロファイラによるレアアース泥の分布予測がどのくらい実際の観測と合うかも検証した。

また、ピストンコアにより採取された堆積物試料は、X線回折装置による構成鉱物同定、蛍光X線分析装置および誘導結合プラズマ質量分析装置による主成分元素、微量金属元素、希土類元素組成についての高精度分析を行い、レアアース泥の品位を求めた。

- (d) **潜水船によるマンガンノジュールの分布状況観察と試料採取**：マルチビーム音響測深機による観測データ取得とともに、潜水船による海底観察を行い音響探査結果からの分布予測と実際の観測結果がどの程度対応するかを検証し、またその際に分析を行うための試料の採取も行った。潜水船によって採取されたマンガンノジュール試料は、X線回折装置による構成鉱物同定、蛍光X線分析装置および誘導結合プラズマ質量分析装置による主成分元素、微量金属元素、希土類元素組成についての高精度分析を行い、南鳥島ノジュールの鉱物学的・化学的特徴の把握を行った。

4. 研究成果

(1) 効率的な広域探査手法の確立

レアアース泥：調査航海により採取されたサブボトムプロファイラーのデータを解析した結果、南鳥島 EEZ 内の堆積物は、音響基盤の上に (1) 音響的に透明な堆積層、(2) 反射面の多数存在する縞状の堆積層の順に累重することが明らかとなった。ピストンコアにより採取された試料との対比によって、これらはそれぞれレアアース泥とそれを覆うレアアースに富まない表層泥に対応することが明らかとなった。これにより、サブボトムプロファイラーによって、基盤となるチャート、その上に堆積するレアアース泥、およびレアアース泥を覆う最上部の表層泥を、船上から容易に見分け、その分布や層厚についての情報を得られることがわかった。

本研究によって、当初の予想以上に高い精度と確度で、レアアース泥の分布を船上から効率良く行うことができるようになった [3]。これにより、今後のレアアース泥開発における効率的な広域探査への道筋を付けることができた。

マンガンノジュール：本研究ではまず、これまでに得られているマルチビーム音響測深機のデータの解析を行い、南鳥島 EEZ 南部から南東部にかけてのレアアース泥露出域において、マンガンノジュール分布を示すと考えられる高反射領域が広く分布していることを明らかにした。

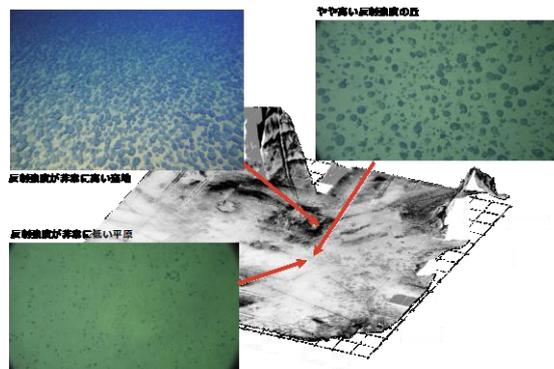


図 1 音響探査における反射強度（黒いほど強い）とマンガンノジュールの分布密度。

次に、上記の解析により後方散乱強度データから予想されるマンガンノジュール存在域において有人潜水調査船「しんかい 6500」を用いた調査航海を実施し、広範囲・多地点での潜水船による海底観察およびマンガンノジュールのサンプリングを、南鳥島 EEZ において初めて行った。そして、南鳥島 EEZ 南部から南東部にかけて合計 8ヶ所で潜航調査を実施し、マンガンノジュールの分布状況観察とサンプルの採取を行った。

最後に、マルチビーム音響測深機によるマンガンノジュール探査手法確立のため、音響探査の結果と海底観察結果の比較検討を行った。その結果、(1) 反射強度の高い海底に実際にマンガンノジュールが分布していることと、(2) 観測されるマルチビーム音響測深機の後方散乱の強さとマンガンノジュールの分布密度が良く対応していることがわかった (図 1)。これにより、船上からの音響調査によってマンガンノジュールの存在を検知できることが明らかとなり、さらにはノジュールの分布密度についてもある程度定量的に把握できる可能性が示された。

(2) 資源分布の確定および資源ポテンシャルの見積り

レアアース泥：本研究によって得られたサブボトムプロファイラーデータの解析の結果、以下のことが明らかとなった。

- (a) 基盤であるチャート層の出現深度は、海底下 20m から 100m 以上と幅があるが、多くの場所では 20~50m 程度である。
- (b) レアアース泥の厚さは場所による違いが小さく、概ね 20~30m 程度の範囲に収まる。
- (c) 表層泥の厚さは場所によって著しく異なり、まったく表層泥が存在しない場所もかなり広範囲に存在している。

この結果を元に、南鳥島 EEZ 全域におけるレアアース泥およびレアアース泥を覆う表層泥の分布を明らかにした (図 2)。それによると、レアアース泥は南鳥島 EEZ の全域に分布しているものの、EEZ の北側では 20m~50m にもおよぶ表層泥がレアアース泥を覆って分布しているため、このエリアでのレアアース

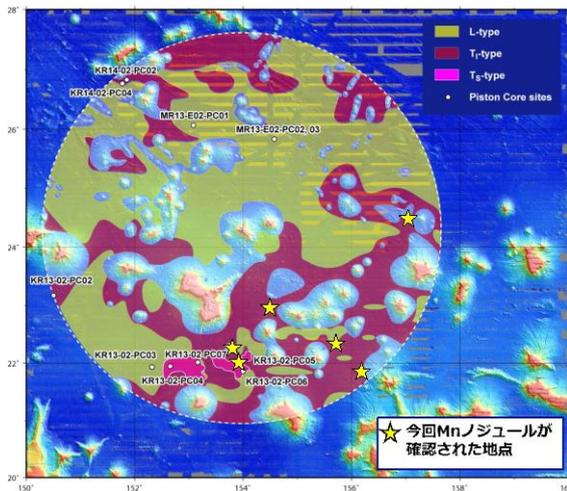


図2 レアアース泥の分布域（赤・ピンク）とマンガンノジュール確認地点（星）。

ス泥の採取は難しい。一方、EEZの南部ではレアアース泥を覆う表層泥の厚さが北側と比べて大幅に薄く、かなりの範囲で表層泥がサブボトムプロファイラーでは見分けられないほど薄いこともわかった。実際にこのような海域では、海底下5m以浅でレアアース泥が出現することが、ピストンコア試料との対比から確かめられた。

この結果から、南鳥島EEZに存在するレアアースの存在量は、南鳥島南方の限られたエリア（2500km²）だけでも世界需要の数百年分におよび[4]、レアアース泥露出エリア全体、あるいは南鳥島EEZ全体に存在するレアアースの量は莫大な量となることが明らかとなった。

マンガンノジュール：前述のように、本研究によって確立された「マルチビーム音響測深機の後方散乱強度分布データからマンガンノジュールの分布を調査する手法」を用いて、南鳥島EEZ内におけるマンガンノジュール分布域を推定した。その結果、ノジュールの分布域は主として南鳥島EEZの南部から東部にかけて広がっていることが明らかとなった。そして、この結果を元に、広いノジュール分布域が見つかった南鳥島南方におけるマンガンノジュールの概略資源量が、6億トンにもものぼるという試算が得られた。本研究の化学分析の結果、南鳥島EEZのマンガンノジュールはコバルトに富むことが明らかとなっており[5]、将来的にはリチウムイオン電池等に必須のコバルト資源としての開発が期待される。

本研究によって南鳥島EEZで確認されたマンガンノジュールの分布地点は、同じく本研究で明らかにしたレアアース泥の分布域（海底面下の浅いところに分布するエリア）と大変良く一致している（図2）。このことからレアアース泥の露出とマンガンノジュールの存在に何らかの成因的な関係があるかもしれないという、非常に興味深い新たな可能性が示唆された。

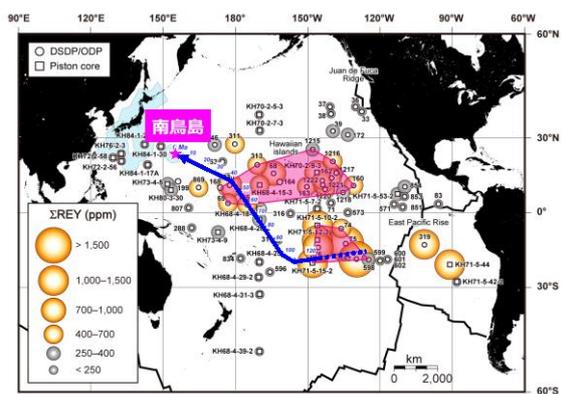


図3 プレート運動による南鳥島の軌跡。

(3) 資源濃集メカニズムの解明

レアアース泥：レアアース泥は、大陸から遠く離れた太平洋の遠洋域に広く分布していることが知られている[2]。そして、このような海域においては、陸源物質および生物源物質の堆積が少ないことから、これらの物質に希釈されることなくレアアース濃集物質（熱水性鉄マンガン酸化物、海水性マンガン酸化物、生物源リン酸カルシウム）が集積され、レアアース泥を形成することが明らかとなっている[6]。

南鳥島EEZの海底はプレート運動の復元から、まず赤道域の生物生産性が高い海域を通った後に、北太平洋のレアアース泥堆積エリアを通過し、陸源物質の供給が多いアジア大陸や伊豆・小笠原島弧近傍の現在の海域に至ったことがわかる（図3）。この結果から予想される堆積物の層序は、(1) 最下位に赤道域で堆積したチャート、(2) その上に堆積するレアアース泥、(3) そして最上位にこれらを覆う大陸起源の堆積物（表層泥）である。本研究のサブボトムプロファイラー観測およびピストンコア分析によって得られた結果は、この層序予想と見事に一致している。このことから、南鳥島EEZのレアアース泥が北太平洋の遠洋域で形成され、プレート運動によって日本の近海まで動いてきたものであることが示された。

さらに、より開発に適すると考えられる「レアアース泥が海底面下の浅い場所に存在する海域」には最上位の表層泥が欠落している。このことは、南鳥島EEZのレアアース泥には、成因とは別に表層泥を取り除くことでレアアース泥を資源としてより魅力的にするためのプロセスが存在していることを示している。この最上位の深海堆積物を部分的に欠落させる有力なプロセスは、深層海流による粒子の堆積阻害（ハイエイタス）もしくは削剥である。すなわち、プレート運動によって日本近海まで運ばれてきたレアアース泥は、その一部が深層海流の影響によって表層泥の被覆を免れたことにより、開発に適した形で存在するようになったと考えられる。

マンガンノジュール：本研究による潜航調査

の結果、南鳥島 EEZ のマンガンノジュールの分布は、レアアース泥露出エリアと非常に良く一致していることが明らかとなった(図 2)。上述のとおり、レアアース泥の露出するエリアというのは表層泥の欠落したエリアであり、その原因は深層海流による表層泥のハイエイタスもしくは削剥であると考えられる。したがって、マンガンノジュールの存在にも、深層海流によるハイエイタス/削剥が関係している可能性が高い。

マンガンノジュールが、深層海流の強い無堆積エリアに存在しているということは、古くから指摘されている [7, 8]。これは、海流によって堆積物が溜まらない場所では、海水からの沈殿によってゆっくりと形成するマンガンノジュールが埋没することなく成長することができるためと考えられる。本研究によって、南鳥島 EEZ のマンガンノジュールも、まさにこの様な場に存在していることが明らかとなった。

南鳥島 EEZ にマンガンノジュールをもたらしたこの深層海流は、どのようなものなのだろうか？太平洋の深層海流の研究は、東京大学海洋研究所のグループによって 1990 年代から継続して行われており、その結果南極深層流から分かれて北上してくる深層海流の一部が南鳥島 EEZ の南部を通っていることが明らかにされている [9]。この海流こそが、南鳥島 EEZ に大規模なマンガンノジュール分布を産み出したと考えられる。

この海流は、マンガンノジュールの形成に関与するだけでなく、前述の通り表層泥の堆積を阻害してレアアース泥を海底下の浅いところに存在させる役目も果たしている。このことから、南鳥島 EEZ の二つの海底鉱物資源は、ともに深層海流の賜物であると言う事ができる。

<引用文献>

- [1] YOKOSUKA Cruise Report YK10-05 (2010) http://www.godac.jamstec.go.jp/catalog/data/doc_catalog/media/YK10-05_all.pdf
- [2] Kato et al. (2011) *Nature Geoscience*, **4**, 535-539.
- [3] Nakamura et al. (2016) *Geochemical Journal*, **50**, 605-619.
- [4] Takaya et al. (2018) *Scientific Reports*, **8**:5763, doi:10.1038/s41598-018-23948-5.
- [5] Machida et al. (2016) *Geochemical Journal*, **50**, 539-555.
- [6] Yasukawa et al. (2016) *Scientific Reports*, **6**:29603, doi: 10.1038/srep29603.
- [7] Kennett and Watkins (1975) *Science*, **188**, 1011-1013.
- [8] Usui et al. (1993) *Marine Geology*, **114**, 133-153.
- [9] Kawabe et al. (2009) *Deep Sea Research Part I*, **56**, 1675-1687.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Yasukawa, K., Nakamura, K., Fujinaga, K., Iwamori, H., and Kato, Y. (2016): Tracking the spatiotemporal variations of statistically independent components involving enrichment of rare-earth elements in deep-sea sediments. *Scientific Reports*, **6**:29603, DOI: 10.1038/srep29603. 査読有
2. Machida, S., Fujinaga, K., Ishii, T., Nakamura, K., Hirano, N., and Kato, Y. (2016): Geology and geochemistry of ferromanganese nodules in the Japanese Exclusive Economic Zone around Minamitorishima Island. *Geochemical Journal*, **50**, 539-555. 査読有
3. Nakamura, K., Machida, S., Okino, K., Masaki, Y., Iijima, K., Suzuki, K., and Kato, Y. (2016): Acoustic characterization of pelagic sediments using sub-bottom profiler data: Implications for the distribution of REY-rich mud in the Minamitorishima EEZ, western Pacific. *Geochemical Journal*, **50**, 605-619. 査読有
4. Fujinaga, K., Yasukawa, K., Nakamura, K., Machida, S., Takaya, Y., Ohta, J., Araki, S., Liu, H., Usami, R., Maki, R., Haraguchi, S., Nishio, Y., Usui, Y., Nozaki, T., Yaamazaki, T., Machiyama, H., Iijima, K., Suzuki, K., Kato, Y., and KR13-02, MR13-E02 Leg.2 and KR14-02 Cruise members (2016): Geochemistry of rare-earth elements and yttrium-rich muds in the Japanese Exclusive Economic Zone around Minamitorishima Island. *Geochemical Journal*, **50**, 575-590. 査読有
5. Iijima, K., Yasukawa, K., Fujinaga, K., Nakamura, K., Machida, S., Takaya, Y., Ohta, J., Haraguchi, S., Nishio, Y., Usui, Y., Nozaki, T., Yamazaki, T., Ichiyama, Y., Ijiri, A., Inagaki, F., Machiyama, H., Suzuki, K., Kato, Y., and KR13-02 Cruise members (2016): The discovery of extremely REY-rich mud in the western North Pacific Ocean. *Geochemical Journal*, **50**, 557-573. 査読有
6. Ohta, J., Yasukawa, K., Machida, S., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Iijima, K., Suzuki, K., and Kato, Y. (2016): Geological factors responsible for REY-rich mud in the western North Pacific Ocean: Implications from mineralogy and grain size distributions. *Geochemical Journal*, **50**, 591-603. 査読有

[学会発表] (計 11 件)

1. 中村謙太郎・町田嗣樹・正木裕香・沖野郷子・飯島耕一・鈴木勝彦・加藤泰浩：サブボトムプロファイラによる深海堆積物の解析とその南鳥島 EEZ におけるレアアース泥分布への示唆。日本地球惑星科学連合 (幕張メッセ, 2015. 5. 25) [招待講演]

2. 安川和孝・大谷和孝・大田隼一郎・高谷雄太郎・藤永公一郎・中村謙太郎・岩森 光・加藤泰浩：独立成分分析に基づく南鳥島 EEZ 内の深海底堆積物の統計的特徴。日本地球惑星科学連合（幕張メッセ，2015. 5. 25）[招待講演]
3. Kato, Y., Fujinaga, K., Yasukawa, K., Ohta, J., Takaya, U., Nozaki, T., Machida, S., Nakamura, K., and Iwamori, K. (2016): REY-rich mud: a perspective on science and engineering of the new REY resource. Sapporo, Japan (June 7, 2016) [招待講演]
4. Nakamura, K., Machida, S., Okino, K., Masaki, Y., Iijima, K., Suzuki, K., and Kato, Y. (2016): Distribution of REY-rich mud in the Minamitorishima EEZ: Implications from subbottom profiling. Rare Earth 2016. Sapporo, Japan (June 7, 2016).
5. Kato, Y., Fujinaga, K., Yasukawa, K., Ohta, J., Takaya, Y., Nozaki, T., Machida, S., Nakamura, K., and Iwamori, H. (2016): REY-rich mud: a perspective on science and engineering of the new REY resource. Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan (June 29, 2016)
6. Fujinaga, K., Yasukawa, K., Ohta, J., Nakamura, K., Takaya, Y., Nozaki, T., Machida, S., Iijima, K., and Kato, Y. (2016): Geochemical features and distribution of the extremely REY-rich mud in the Minamitorishima EEZ. Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan (June 29, 2016)
7. Mimura, K., Nakamura, K., Yasukawa, K., Ohta, J., Fujinaga, K., Machida, S., and Kato, Y. (2016): Chemostratigraphic correlation of deep-sea sediments in the western North Pacific Ocean and its implication for the origin of the extremely REY-rich mud. Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan (June 29, 2016)
8. Ohta, J., Nakamura, K., Yasukawa, K., Fujinaga, K., Iijima, K., Iwamori, H., and Kato, Y. (2016): A distribution of Cretaceous to Paleogene deep-water agglutinated foraminifers in the western north Pacific Ocean. Goldschmidt Conference 2016, Yokohama, Japan (June 27, 2016)
9. 中村謙太郎：意外に豊かな日本の海底鉱物資源—その探査と開発の最前線—。第6回 CSJ 化学フェスタ 2016 (タワーホール船堀，2016. 11. 16) [招待講演]
10. Mimura, K., Yamamoto, K., Nakamura, K., Yasukawa, K., Ohta, J., Fujinaga, K., Machida, S. and Kato, Y. (2017): A Chemostratigraphic Correlation of Pelagic Clay in the North Pacific Ocean. Goldschmidt Conference 2017, Paris, France (August 16, 2017)
11. Tanaka, E., Yasukawa, K., Nakamura, K., Miyazaki, T., Vaglarov, B., Ohta, J., Fujinaga, K., Iwamori, H. and Kato, Y. (2017): The

Origin of Deep-Sea Sediments in the Western North Pacific Ocean Based on Neodymium and Strontium Isotopic Ratios. Goldschmidt Conference 2017, Paris, France (August 16, 2017)

[図書] (計 1 件)

1. Nakamura, K., Fujinaga, K., Yasukawa, K., Takaya, Y., Ohta, J., Machida, S., Haraguchi, S., and Kato, Y. (2015): REY-Rich Mud: A Deep-Sea Mineral Resource for Rare Earths and Yttrium. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, vol. 46, 79-127, Elsevier.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 謙太郎 (NAKAMURA, Kentaro)
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：40512083

(2) 研究分担者

沖野 郷子 (OKINO, Kyoko)
 東京大学・大気海洋研究所・教授
 研究者番号：30313191

加藤 泰浩 (KATO, Yasuhiro)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：40221882

町田 嗣樹 (MACHIDA, Shiki)
 千葉工業大学・次世代海洋資源研究センター・上席研究員
 研究者番号：40444062

佐藤 太一 (SATO, Taichi)
 国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究員
 研究者番号：50613246

藤永 公一郎 (FUJINAGA, Koichiro)
 千葉工業大学・次世代海洋資源研究センター・上席研究員
 研究者番号：90409673

(3) 連携研究者

()

(4) 研究協力者

()